数理解析研究所講究録
21 巻 1967 年 37-46

Combinatorial Prebundle

都立大　　加藤 十吉

1. Prebundle.

定義： Pを多面体，pをPの一点とする。(P, p)が prebundle とは，次から成る triple $\mathbb{E} = \{E, K, \Sigma\}$ のことである。

(1)　E ；多面体　　(全空間)

(2)　K ；複　体　　(底複体)

(3)　Σ ；次の4つの条件(a)〜(d) をみたす対(A, f) の集まり。(A上の自明化とよばれる)

(a)　各対(A, f)はKの単体Aと，PL embedding f ; $A \times P \longrightarrow E$ から成る。

(b)　各単体$A \in K$に対し，少なくとも1つの対(A, f)が存在し，$\bigcup_{(A,f) \in \Sigma} f(A \times P) = E$ となる。

(c)　$(A, f), (B, g) \in \Sigma$ で，$A \cap B$ が空でない単体Cなら，$f(C \times P) = g(C \times P)$ かつ

$$f \mid C \times \{p\} = g \mid C \times \{p\}.$$

(d)　Σは(C)に関して最大である。

もう1つの(P, p) prebundle $\mathbb{E}' = \{E', K, \Sigma'\}$が，$\mathbb{E}$に同型とは，PL同相写像$h$; $E \to E'$が存在し，$^\forall(A, f) \in \Sigma$，$^\forall(A, g) \in \Sigma'$に対して$hf(A \times P) = g(A \times P)$かつ，$hf | A \times \{p\} = g | A \times \{p\}$となるときをいう。（詳しくは[5]参照のこと）

(例)　積prebundle．

積多面体$|K| \times P$は，$(^\forall A \in K)$ $A \times P \subset |K| \times P$なる包含写像をとれば，これをA上の自明化として，prebundleの構造をもつことになる。これを積prebundleと呼び単に，$K \times (P, p)$と表わす。

P prebundleという概念も，(P, p) prebundleと同様に（但し，pに関する条件をとり去って）定義される。上の例からもわかるように，prebundleとは積多面体の抽象である。以前から考えられていたfibre bundleはfibre structure（即ち，projection）をも抽象しているが，prebundleではそれまで抽象しない。むしろprebundleは常にfibre bundleとなるかという点に興味がある。念のため，PL-categoryのfibre bundleを次に定義しておく。(P, p) bundleとは，図式ξ; $B \xrightarrow{i} E \xrightarrow{j} B$で，

(1)　E，Bは多面体で，全空間，底空間と呼ばれ，

(2) PL 写像 j ; $E \to B$ は PL 写像 i ; $B \to E$ に関して 次の局所自明条件を満たす。

B の各点 x_0 に対し，x_0 の B における近傍 U 及び PL 同相写像 f ; $U \times P \to j^{-1}(U)$ が存在し，$jf(x, y) = x$，$f(x, p) = i(x)$ $(\forall x \in U, \forall y \in P)$

(P, p) bundle の理論では，induced bundle，covering homotopy theorem 等の general theory が成立している。とくに，B のある単体分割 K に関して，その underlying prebundle が得られる。この逆が可能か？ 即ち，いかなる (P, p) prebundle もある (P, p) bundle の underlying prebundle となるか？ という問題は後でわかるように否定される。

(P, p) bundle の主 bundle の作り方は，Milnor の micro-bundle の C.S.S. 主 bundle の作り方と全く同様にして，(isomorphism germ を isomorphism そのものにおきかえて) 定義される。prebundle の主バンドルは，C.S.S. bundle ではなく，抽象複体の bundle (a.s. bundle) を考えることによって定義される。

定義 ; (P, p) prebundle の構造群 $PR(P, p)$.

$PR(P, p)$ の k simplex とは，積 prebundle $\Delta_k \times (P, p)$ の同型写像 h ; $\Delta_k \times (P, p) \to \Delta_k \times (P, p)$ であり，Δ_k の

face Δ'に対し対応する face $h|\Delta'\times(P,p)$ をもつとする。但し，Δ_kは標準的な単体および，それを coverする複体を表わすとする。この様にして，$PR(P,p)$は抽象複体の構造をもつ。しかし，degeneracy operatorは自然には決らぬ。ふつうのやり方では，standard mistake によりPL category を出してしまうからである。幸いなことに，$PR(P,p)$の特殊性から，homotopy group $\pi_k(PR(P,p))$ が定義できる。即ち，Kanの combinatorial methodを模倣すれば良い [4]。そのとき，Kanの拡大条件が$PR(P,p)$に対し成立し，Kanが degeneracy operator を使っているところが初等的な trick によってPL同相写像の性質で書きかえられるのを見ればよい。

prebundleの主 bundleは a.s. $PR(P,p)$ bundle として定義される。そして，prebundle を trivialize するための障害の理論が係数群 $\pi_k(PR(P,p))$ で論じられる。

Notation ;

J^n ; n-cube （$[-1,1]=J$ の n重積）

$0=(0,\cdots,0)\in J^n$

とおき，prebundle の構造群を次の様にかく。

$$PR(J^n,0)=PR_n$$

$$PR(\dot{J}^n,0)=\dot{P}R_n$$

$$PR(\dot{J}^n, (0^{n-1}, 1)) = \dot{P}R_{*n}$$
$$PR(\mathring{J}^n, 0) = \mathring{P}R_n$$
($\dot{J}^n$ はJ^nの境界(n−1) sphere, $\mathring{J}^n$ はJ^nの内部(R^nとPL同相))

これらの間に次の関係がある。

$PR_n \simeq \mathring{P}R_n$ （$\simeq$は weak homotopy equivalence）

これは，join extension argument で示される。

$\dot{P}R_{*n} \simeq PR_{n-1}$

これは，relative regular neighborhood の一意性により示される。

$\pi_k(\mathring{P}R_n, \dot{P}R_{*n}) \cong 0$ （$k \leq n-2$）がすべての n についていえる。この場合は $n \geq 4$ or $k \geq 2$ のときは，Zeeman の unknotting theorem で，$k=1$, $n=3$ のときは Gluck の結果[1]による。

かくて，安定定理

$$\pi_k(PR_n) \cong \pi_k(PR_{k+2}) \quad (\forall n \geq k+2)$$

が得られる。

2. 法 prebundles

(J^n, 0) prebundle を n prebundle と呼ぼう。PL-embedding $f: M \longrightarrow W$ (M, W ; PL-manifolds) が M の単体分割 K に対して法 prebundle をもつとは，n prebundle

$\mathbb{N}$; $K \xrightarrow{f} N\ (\Sigma)$ （f の K 上の法 prebundle）が，N が $f(M)$ の W における近傍となる様に存在するときをいう。このとき，N は $f(M)$ の W における regular neighborhood で，f は locally flat である。次の法 prebundle の存在定理 theorem 1 は locally flat PL manifold pair の regular neighborhood の dual cell pair decomposition に目をつけ，更に，relative regular neighborhood の理論から出る球面上の法 prebundle の一意性定理 theorem 2 を使って証明される。

Theorem 1.

PL-embedding f ; $M \to W$ （M, W ; PL-manifolds）がいかなる M の単体分割に対しても法 prebundle をもつための必要十分条件は，f が locally flat であることである。

Theorem 2.

K を PL-m sphere S^m の任意の単体分割とする。いかなる PL embedding f ; $S^m \to W$ も，次の意味で高々一意的に法 prebundle をもつ。

もし，$\mathbb{N}_i$; $K \xrightarrow{f} N_i\ (\Sigma_i)$，$i=1,2$ が2つの f の K 上の法 prebundle なら，PL ambient isotopy F ; $W \to W$ が存在して，F/N_1 は $\mathbb{N}_1$ から $\mathbb{N}_2$ への同型写像となる。

theorem 1 により，locally flat PL embedding に対す

る法 prebundle の存在は，係数群 $\pi_k(PR_n, \pi L_n)$ の障害の理論で論じられる。（但し，πL_n は $(J^n, 0)$ bundle の構造群を表わす。）

次の対 $(PR_n, \pi L_n)$ の homotopy exact sequence を眺めながら，theorem 2 を使うと，$k+1$ sphere の locally flat embedding に対する法 prebundle の存在および一意性の判定条件が準同型写像 i_k ; $\pi_k(\pi L_n) \to \pi_k(PR_n)$ により記述できる。

$$\cdots \xrightarrow{j_{k+1}} \pi_{k+1}(PR_n, \pi L_n) \xrightarrow{\partial_{k+1}} \pi_k(\pi L_n) \xrightarrow{i_k} \pi_k(PR_n) \xrightarrow{j_k} \pi_k(PR_n, \pi L_n) \to$$

Theorem 3.

$k+1$ sphere S^{k+1} の $k+1+n$ sphere S^{k+1+n} への standard PL embedding は trivial な法 cell bundle しかもたない。 $\iff$ $\mathrm{Ker}(i_k) = 0$

Theorem 4.

$k+1$ sphere の codimension n をもついかなる locally flat PL embedding に対しても法 cell bundle が存在する。 $\iff$ $\mathrm{Coker}(i_k) = 0$.

例 1. (N.H. Kuiper and R.K. Lashof)

Kuiper-Laschof により，準同型写像 t_k^n ; $\pi_k(O_n) \to \pi_k(\pi L_n)$ は $\forall k$; $n \leq 4$ に対して monomorphism

である。[7]. 一方, J. Levineにより differentiable knots x_k in $\Theta^{k+4,k}$, $k=7,8,9,11$ で $\partial_k'(x_k)\neq 0$ となるものが存在する。(但し, $\partial_k'(x_k)=x_k$の法 vector bundle) x_kを smooth triangulate して, Zeeman の unknotting theorem, および theorem 2 を使って, $(\Delta_{k+1},\partial\Delta_{k+1})$ 上の relative $(PR_4,\Pi L_4)$ bundles σ_k, $k=7,8,9,11$ が得られる。σ_k は $\Pi_k(PR_4,\Pi L_4)$ の元とみなしたとき, $\partial_k(\sigma_k)=t_k^4\partial_k'(x_k)$ となっている。 t_k^4 は monic だから, $\partial_k'(x_k)\neq 0$より, $\partial_k(\sigma_k)\neq 0$, よって Ker $i_{k-1}\neq 0$ for $k=7,8,9,11$ かくて, S^k $(k=7,8,9,11)$ の S^{k+4} の中への standard なPL embedding は non trivial 法 cell bundle をもつ。

例2. (M. W. Hirsch) [2]

或る種の differentiable knot x_7 in $\Theta^{11,7}$ を smooth triangulate し, relative $(PR_4,\Pi L_4)$ bundle σ over $(\Delta_8,\partial\Delta_8)$ で, $\sigma\neq 0$ in $\Pi_7(PR_4,\Pi L_4)$だが, $\partial_7(\sigma)=0$ となるものが得られる。よって, Ker ∂_7 = Coker $i_7\neq 0$. かくて, S^8 上の 4 prebundle で, cell bundle の underlying prebundle とならぬものが存在する。(勿論 この prebundle の zero-section は法 cell bundle の存在しない locally flat embedding の例でもある。)

3. $S^p \times S^q$ の pseudo-isotopy group への応用.

$PL(S^p \times S^q) = \{f : S^p \times S^q \to S^p \times S^q,$ PL homeomorphism$\}$ とおく。$f, g \in PL(S^p \times S^q)$ が pseudo-isotopic とは、$\exists h \in PL(I \times S^p \times S^q)$ such that

$$h(0, x) = (0, f(x)), \quad h(1, x) = (1, g(x))$$

$(\forall x \in S^p \times S^q)$ のときをいう。pseudo-isotopy という関係は同値関係で, pseudo-isotopy 類の全体は, 群 $\pi PL(S^p \times S^q)$ をなす。このとき, $p > q \geq 2$, 或いは, $p > 4$, $q = 1$ のとき, 集合として $\pi PL(S^p \times S^q)$ は, $\pi_p(PR_{q+1}) \times \pi_q(PR_{p+1}) \times Z_2 \times Z_2$ と1対1に対応する。とくに, $\pi PL(S^p \times S^1) \cong Z_2 \oplus Z_2 \oplus Z_2$ $(p \geq 4)$ がいえるので, Gluck の結果[1] を pseudo-isotopy の意味で拡大できたことになる。[6].

参考文献

[1] H. Gluck, the embedding of two sphere in the four sphere, Trans. Amer. Math. Soc. 104 (1962) 303 − 333

[2] M.W. Hirsch, On tubular neighborhoods of manifolds I, II, Proc. London. Math. Soc.

62 (1966) 177-181, 183-185.

[3] J.F.P. Hudson, Concordance and isotopy of PL embeddings, Bull. Amer. Math. Soc. 72 (1966), 534-535

[4] D.M. Kan, A combinatorial definition of homotopy groups. Ann. of Math., 67 (1958) 282-312

[5] M. Kato, Combinatorial prebundles, Part 1 (to appear)

[6] M. Kato, A pseudo isotopy classification of PL automorphisms of $S^p \times S^q$, (to appear)

[7] N.H. Kuiper and R.K. Lashof, Microbundles and bundles, Part C, (mimeographed)